

Санкт-Петербургский государственный университет

ВАСИЛЬЕВА Анна Сергеевна

Выпускная квалификационная работа

Сильная турбулентность в Санкт-Петербургском районе полетной информации

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа СВ.5021.2015 «Гидрометеорология»

Профиль «Метеорология и климатология»

Научный руководитель:

Доцент кафедры климатологии и
мониторинга окружающей среды

Санкт-Петербургского государственного университета

кандидат географических наук

Юрова А.Ю.

Рецензент:

Санкт-Петербургский государственный морской университет

кандидат географических наук

доцент

Граховский Г.Н.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Виды атмосферной турбулентности.....	6
1.1 Динамическая турбулентность.....	6
1.2 Орографическая турбулентность.....	7
1.3 Термическая турбулентность.....	8
1.4 Турбулентность ясного неба.....	9
1.5 Турбулентность в облаках.....	10
1.6 Турбулентность в струйных течениях и в зоне тропопаузы.....	11
Глава 2. Турбулентность в свободной атмосфере.....	13
2.1 Источники данных и категории интенсивности болтанки.....	13
2.2 Повторяемость турбулентности.....	17
2.3 Синоптические условия возникновения турбулентности.....	18
Глава 3. Анализ полученных данных.....	21
3.1 Обработка данных.....	21
3.2 Рекомендации.....	31
Заключение.....	32
Список литературы.....	34
Приложение 1.....	35
Приложение 2.....	37
Сокращения, используемые в тексте.....	38

Введение

Среди метеорологических явлений, оказывающих влияние на полеты воздушных судов, *Атмосферная турбулентность* является одним из опасных явлений для авиации.

Результатом воздействия атмосферной турбулентности на воздушное судно (ВС) является болтанка - резкое перемещение воздушного судна в вертикальной плоскости; Особенно сильная болтанка - явление сравнительно редкое, но, тем не менее, внезапное попадание самолета в зону сильной турбулентности может стать причиной серьезных летных происшествий.

Так 17 марта 1960 года в США пассажирский самолет Lockheed L-188 Electra потерпел катастрофу вследствие турбулентности ясного неба.

5 марта 1966 года Boeing 707 в Японии (на горе Фудзи) внезапно разрушился в воздухе, после чего обломки врезались в склон горы. Погибли 124 человека. Катастрофа произошла при ясном небе вследствие турбулентности ясного неба, превысившей допустимые нагрузки на конструкции самолета.

6 августа 1966 года самолет BAC1-11 в США потерпел катастрофу при попадании в зону сильной турбулентности ясного неба.

12 ноября 2001 года Airbus A300 потерпел катастрофу из-за сильной турбулентности.

Гораздо чаще сильная турбулентность является причиной травм пассажиров во время полета. В октябре 2002 года. В процессе набора высоты самолет австралийской авиакомпании Qantas, летевший из Токио в Сидней, попал в зону сильной турбулентности - двенадцать человек получили серьезные ранения.

1 мая 2017 года Boeing 777, летевший по маршруту Москва – Бангкок, при подлете к бангкокскому аэропорту "Суваннапум" попал в зону турбулентности ясного неба. В результате пострадали 27 человек, в том числе 24 россиянина. Всем оказали медицинскую помощь, некоторым пострадавшим потребовались операции.

За период времени с 1980 по 2008-й годы американские авиакомпании сообщили о 234-х случаях турбулентности достаточно сильной, чтобы охарактеризовать ее, как «происшествие». Серьезно пострадали 298 человек, трое – погибли. Между 2009 и 2011 годами турбулентность нанесла разного рода травмы 147 пассажирам и членам экипажа авиалайнеров.

В связи с этим прогноз турбулентности имеет большое значение. Поэтому перед синоптиками АМЦ и АМСГ стоит сложная задача прогноза атмосферной турбулентности.

В настоящее время сообщения пилотов с бортов воздушных судов по-прежнему остаются основными источниками информации о наличии или отсутствии турбулентности в атмосфере. Сообщения с бортов воздушных судов поступают как по речевым каналам связи, так и автоматически (система AMDAR). Данный тип информации помогает при составлении прогнозов по маршрутам полетов.

Для качественного метеорологического обеспечения полетов специалисты метеослужбы должны знать и учитывать синоптические, метеорологические и климатические особенности возникновения турбулентных зон в контролируемом воздушном пространстве при оценке метеорологической обстановки.

В случаях прогноза сильной или умеренной турбулентности или при поступлении такой информации с борта воздушного судна, органом метеорологического слежения выпускаются сообщения SIGMET (о сильной турбулентности) или AIRMET (об умеренной турбулентности) для района полетной информации. Эта информация предоставляется экипажам воздушных судов во время проведения предполетной метеорологической консультации и передается на борт воздушного судна диспетчерами ОВД.

Для прогноза турбулентности синоптики используют различные прогностические методы, в том числе численные прогнозы погоды (ЧПП), основанные на разных прогностических моделях атмосферы. Однако, оправдываемость этих методов пока недостаточно высокая, и они используются как консультативные методы. Более того, в некоторых случаях разные методы дают противоположные результаты, и перед синоптиком встает вопрос какому именно численному прогнозу отдать предпочтение. Поэтому на практике для прогноза турбулентности кроме ЧПП используется и синоптический метод прогноза.

Суть синоптического метода прогноза атмосферной турбулентности, вызывающей болтанку воздушных судов, заключается в комплексном анализе фактических и прогностических приземных карт и карт барической топографии разных уровней, с целью выявления особенностей атмосферных полей и процессов, характерных для возникновения атмосферной турбулентности.

Особенности орографии, свойств подстилающей поверхности и циркуляции атмосферы, характерные для отдельного района, также оказывают влияние на возникновение зон атмосферной турбулентности.

Цель данной работы: на основе фактических данных о наличии или отсутствии турбулентности выявить особенности термобарических полей и полей ветра, характерных для Санкт-Петербургского района полетной информации (РПИ) для уточнения синоптического метода прогноза турбулентности.

Для достижений данной цели были поставлены следующие задачи:

- Проанализировать термобарические поля в районах полета на различных высотах, где были зарегистрированы случаи болтанки.
- Определить основные типы конфигураций термобарических полей (синоптические условия), при которых в Санкт-Петербургском РПИ наиболее вероятно возникновение турбулентных зон.
- Установить взаимосвязь между термобарическими условиями и полями ветра на различных эшелонах полета для возможности прогнозирования явления турбулентности.
- Сформулировать рекомендации для уточнения составления прогноза турбулентности в Санкт-Петербургском РПИ.

Для исследования использовались архивные данные сообщений с бортов воздушных судов, осуществлявших полеты в Санкт-Петербургском РПИ, полученные из архивов АМЦ Пулково, и карты барической топографии (АТ-850, АТ-700, АТ-500, АТ-400, АТ-300, АТ-250, АТ-200).

Анализировались данные сообщений с бортов воздушных судов, поступающих как по речевым каналам связи, так и автоматически (система AMDAR). Так как архив данных AMDAR за рассматриваемый 2016 год отсутствует, были рассмотрены сообщения за период с января по май 2019 года.

Глава 1. Виды атмосферной турбулентности

Атмосфера практически всегда находится в турбулентном состоянии. Такой характер воздушных движений вызывается термодинамическими причинами. Основной причиной турбулизации воздушных потоков являются температурные контрасты и градиент скоростей ветра. Различные процессы порождают эти контрасты, например:

- Трение воздушного потока о поверхность земли (вертикальные градиенты нижнего слоя)
- Деформация воздушных потоков орографическими препятствиями
- Неравномерный нагрев подстилающей поверхности (возникновение термической конвекции)
- Процессы облакообразования (выделение тепла конденсации, изменяющей характер полей ветра и температуры)
- Наличие инверсионных слоев (порождающие гравитационные волны, теряющие устойчивость при определенных условиях)
- Взаимодействие ВМ с различными термодинамическими характеристиками (резко выраженные горизонтальные градиенты на границах ВМ) (Богаткин, 2005)

Данные процессы могут возникать как по-отдельности, так и действовать одновременно, усиливая или ослабляя турбулентное состояние атмосферы. Для классификации турбулентности, рассматривают особенности ее развития. Таким образом, различают *термическую, динамическую (механическую) и орографическую турбулентность, турбулентность ясного неба.*

1.1 Динамическая турбулентность

Динамическая турбулентность возникает по разным причинам. Первая - вследствие трения воздушного потока о неровности земной поверхности, формируя профиль ветра с большими вертикальными градиентами. В таком случае развитие динамической турбулентности зависит от степени шероховатости поверхности и от скорости воздушного потока. Потому интенсивность динамической турбулентности будет возрастать с усилением скорости ветра над пересеченной местностью, а также, при условиях усиления неустойчивости воздушных масс (ВМ).

Также динамическая турбулентность возникает в слоях с большими вертикальными и горизонтальными градиентами ветра и температуры. Вследствие больших температурных градиентов и градиентов ветра образуются гравитационные и гравитационно-сдвиговые волны, которые при определенных условиях теряют свою устойчивость, разрушаются и переходят в турбулентные вихри мелкого масштаба. (Богаткин, 2005)

Динамическая турбулентность наблюдается также в тех слоях атмосферы, где имеются резкие изменения ветра по скорости и по направлению, как по вертикали, так и по горизонтали, а такие условия обычно наблюдаются:

- у границ инверсий
- в зоне тропопаузы
- в струйных течениях, где наблюдаются большие изменения скорости ветра на границе трения быстро движущихся потоков с более спокойной окружающей средой
- на границах раздела двух ВМ в зонах атмосферных фронтов (Позднякова, 2010)

1.2 Орографическая турбулентность

В горных районах возникает деформация воздушного потока. На подветренных склонах в общем нисходящем потоке воздуха, переваливающем через хребет, развивается наиболее сильная вихревая деятельность, выраженная волновыми возмущениями, роторными движениями — это так называемая **орографическая турбулентность**. (Рис.1) (Позднякова, 2010)

Роторы (вихри) концентрируются под гребнями подветренных волн. Самый опасный и наиболее интенсивный для авиации ротор

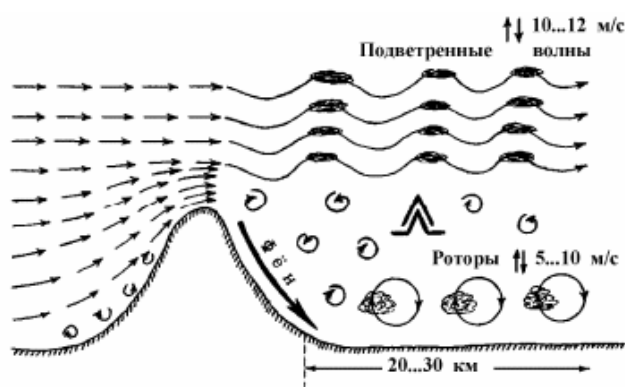


Рис.1 Структура воздушного потока над горами; образование орографической турбулентности

образуется под первым гребнем горной волны, ближайшим к хребту. Распознать его можно по характерному развитию кучевого облака с рваными краями, так называемого *роторного облака*, основание которого обычно расположено на уровне горного хребта.

Благоприятные условия для возникновения орографической турбулентности:

- ветер со скоростями более 10 м/с, направленный почти перпендикулярно горному хребту;
- усиление ветра в невозмущенном воздушном потоке до высоты, примерно в 1,5 раза превышающей высоту хребта, а затем резкое ослабление; (Сафонова, 2005)
- температурная инверсия над хребтом (устойчивая стратификация);

При полете над подветренной стороной горного хребта воздушное судно может быть втянуто нисходящими токами в зону сильной орографической турбулентности. Поэтому роторно-волновая деформация воздушного потока в горных районах является наиболее опасной для авиации.

1.3 Термическая турбулентность

Термическая турбулентность — является результатом развития в атмосфере неупорядоченных конвективных движений. Возникает такой вид турбулентности вследствие неравномерного прогрева подстилающей поверхности. Над сильно нагретыми участками земной поверхности образуются особые элементы конвекции — термики, расположение которых в пространстве носит хаотический характер.

Термики могут принимать форму струи или пузыря, в зависимости от условий состояния атмосферы и характера подстилающей поверхности. Неустойчивая стратификация атмосферы - обязательное условие для развития термической турбулентности.

При относительно слабом ветре у поверхности Земли происходит образование струй, которые «привязаны» к определенному участку поверхности («источнику тепла»). Вертикальные размеры таких термиков могут достигать как сотен, так и нескольких тысяч метров. Такие струи можно наблюдать летом над перегретыми скальными породами, горными вершинами, в зоне лесных пожаров, над вулканами. (Метеорологические условия..., 1983)

При неустойчивой стратификации струи могут вращаться вокруг своей оси. В случаях усиления приземного ветра, могут перемещаться по потоку или образовать свободно

плавающий термик - пузырь. В условиях неустойчивой стратификации термики поднимаются вверх.

Особенностью термической турбулентности является четко выраженный суточный и годовой ход процесса. Развивается такой тип турбулентности в основном в теплый период года, зимой - в конвективной облачности. Суточный максимум теплого периода года приходится на околополуденные часы над сушей и ночью над водной поверхностью.

Зимой термическая турбулентность не наблюдается в умеренных широтах над сушей, покрытой снегом, вследствие большого значения альбедо, а тепловая энергия над влажной почвой тратится на испарение. При адвекции холода развитие турбулентности усиливается, при адвекции тепла - ослабевает.

Термическая и динамическая турбулентности часто действуют одновременно, вызывая болтанку самолетов.

1.4 Турбулентность ясного неба

Турбулентность ясного неба - наиболее сложный для изучения, и опасный вид турбулентности для авиации - вследствие внезапности ее возникновения. Характерными особенностями являются ее перемежаемость и резкая локализация в окружающем спокойном потоке.

Турбулентность ясного неба (ТЯН/САН) – турбулентность в свободной атмосфере, возникающая в слоях перистых облаков, или при отсутствии зон конвективной деятельности. Часто ТЯН связывают со струйными течениями (СТ) и высотными фронтальными зонами (ВФЗ).

Также исследователи подчеркивают, что атмосферные течения, в которых развивается ТЯН, имеют сложные вертикальные профили ветра и температуры, что затрудняет теоретический анализ процесса и условий его развития. (Богаткин, 2005)

Богаткин О.Г. в своей работе *«Авиационной метеорология»*(2005г.) отмечает, что в случае ТЯН турбулизация воздушного потока в отдельных замкнутых областях является следствием роста амплитуд внутренних волн в результате гидродинамической неустойчивости воздушного потока со сдвигом ветра (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца). Он также отмечает, что волны в атмосфере, длина которых меньше

критической, при определенных условиях распределения температуры и ветра - должны сначала усиливаться, а затем разрушаться и переходить в турбулентность более мелкого масштаба. Описанное явление можно наблюдать на поверхности раздела в атмосфере.

Наибольшая повторяемость умеренной и сильной ТЯН отмечается на холодной циклонической стороне струйного течения несколько ниже его оси. (Сафонова, 2005)

Если вдоль потока СТ наблюдаются вытянутые полосы радиальных облаков, атмосферная турбулентность проявляется в этой области чаще, чем при безоблачном небе. Чем интенсивнее и быстрее изменяется вид облаков, тем больше турбулизована атмосфера.

1.5 Турбулентность в облаках

Исходя из наблюдений, было отмечено, что на всех уровнях в атмосфере турбулентность в облачных системах встречается чаще, чем при безоблачном небе. В основном это связано с тем, что в облаках отмечается безразличная или неустойчивая стратификация. Усиливает явление большая протяженность неоднородных полей температуры и плотности воздуха в облаках. Также стоит учесть, что турбулентность является одним из облакообразующих факторов, облака чаще всего развиваются в зонах, где «турбулентный фон» повышен.

Повторяемость болтанки в облаках различных форм неодинакова, и зависит от физической природы возникновения облачных систем. Например, в системе As-Ns, которая образуется при слабых вертикальных токах (см/сек), повторяемость болтанки составляет 30%. В облаках вертикального развития (скорость вертикальных токов в облаке - десятки метров в секунду)- близка к 100%. (Турбулентность в...,1976)

В таблице 1 приведены данные, полученные С.М. Шметером о повторяемости (%) болтанки самолетов в облаках различных форм:

Формы облаков					Без уточнения формы
St, Sc	Ns-As	Ac	Ci, Cs, Cc	Cu,Cu cong,Cb	
34	30	29	34	95	40

Таблица 1. Повторяемость (%) болтанки самолетов в облаках различных форм (по С.М. Шметеру)

1.6 Турбулентность в струйных течениях и в зоне тропопаузы

Если убрать из рассмотрения полеты в облаках, то в верхней тропосфере наибольшая повторяемость турбулентных случаев и максимальные перегрузки наблюдаются в зонах струйных течений и вблизи тропопаузы.

Зона тропопаузы. Авторы работы «Турбулентность в свободной атмосфере» выделяют три модели турбулентности, вблизи тропопаузы и уровня с максимальной скоростью ветра (Рис.2):

1) Однослойная модель

Максимум повторяемости и интенсивности

турбулентности приходится на область под тропопаузой. В области тропопаузы ветры слабые. (Рис.2а)

2) Двухслойная модель

Высота тропопаузы (1) и уровня максимального ветра (2) почти совпадают или тропопауза находится выше уровня максимального ветра (Рис.2б и 2в).

В случае 2б, когда уровни совпадают, турбулентный слой наблюдается под тропопаузой, усиленный влиянием СТ и в слое тропопаузы под влиянием СТ.

В случае 2в турбулентный слой непосредственно под тропопаузой усиливается влиянием струйного течения.

3) Трехслойная модель

Уровень максимального ветра расположен над тропопаузой. Два турбулентных слоя, обусловленные влиянием СТ, расположены над тропопаузой, один – под тропопаузой.

На Рис.3 представлены интегральные кривые повторяемости разности высот уровня максимальной скорости ветра и высоты тропопаузы (Δz). Согласно представленным в указанной работе выводам, над Ленинградской областью высота

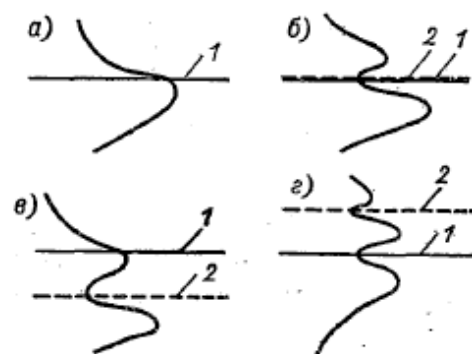
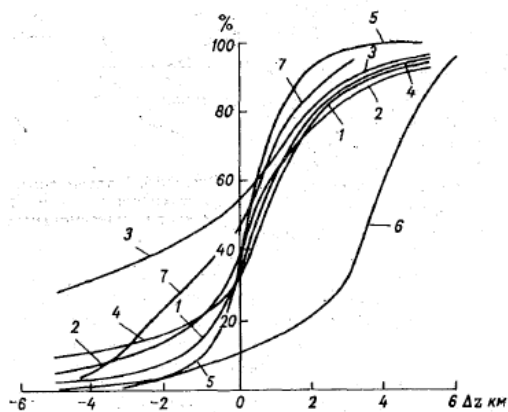


Рис.2 Модели распределения турбулентности в зоне тропопаузы и уровня максимального ветра



5- Средняя годовая для Ленинградской области

Рис.3 Интегральная повторяемость разности между высотой тропопавзы и высотой уровня максимального ветра

максимальной скорости ветра расположена под тропопавзой в 68% случаев (в среднем за год), в 10% - они совпадают, в 22% тропопавза расположена ниже уровня максимальных ветров. (Турбулентность в..., 1976)

Согласно исследованиям [10] слой максимальных ветров расположен между 1 км над уровнем тропопавзы и до 2 км под ней.

Струйные течения. Турбулентность умеренной и сильной интенсивности чаще всего связана с кучево-дождевой облачностью либо с наличием струйных течений (как правило, турбулентность здесь возникает при ясном небе). Ранние исследования показали, что чаще всего болтанка отмечается не на оси струи, а на ее периферии, в областях резкого изменения скорости и направления ветра.

Зоны турбулентности расположены не во всей области струйного течения, на фоне спокойных участков могут возникать локальные турбулентные зоны. Стоит отметить, что полет в одном и том же районе, на одном и том же эшелоне через небольшой промежуток времени в одном случае может сопровождаться болтанкой, а в другом – нет, что говорит о частой пространственной и временной изменчивости турбулентных зон.

Распределение турбулентных зон в области струйного течения обусловлено большими горизонтальными и вертикальными градиентами скорости ветра. Так, например, выделяют две области: область на холодной (циклонической) стороне, ниже оси струи, и на теплой (антициклонической) стороне СТ, выше его оси. Ранние исследования также показали, что на холодной стороне СТ градиенты ветра в 1,5 раза больше, чем на теплой, а повторяемость болтанки составляет 40 и 30 % соответственно. (Богаткин, 2005)

Струйное течение может облегчить, усложнить или вовсе сделать невозможным выполнения рейса. Попадание в зону турбулентности – опасно. Особенно, если воздушное судно попало в зону турбулентности на высотах практически близких к потолку самолета, где устойчивость и управляемость ВС уменьшена, а диапазон возможных скоростей полета ограничен.

Глава 2. Турбулентность в свободной атмосфере

Полет самолета в турбулентной атмосфере сопровождается *болтанкой* - появлением знакопеременных ускорений, линейных колебаний центра тяжести самолета и угловых колебаний относительно центра тяжести. В полете болтанка ощущается как неупорядоченные толчки (броски), тряска, вздрагивание или перемещения ВС в вертикальной плоскости.

2.1 Источники данных и категории интенсивности болтанки

Основными источниками информации о турбулентности являются сообщения пилотов (в терминах ВМО – информация AIREP), а также автоматически измеренные и автоматически переданные метеорологические параметры (система AMDAR).

AMDAR- автоматизированная система передачи наблюдений с бортов ВС (как коммерческих, так и военных и частных). Информация AMDAR передается с бортов ВС, имеющих специальное оборудование и программное обеспечение, на всех этапах полета.

Система AMDAR позволяет получать в режиме близкому к реальному времени информацию о местонахождении ВС, направление и скорость ветра, температуру воздуха, а также данные о влажности, турбулентности и обледенении. Частота передачи данных: от 3 до 60 сек. на этапе подъема воздушного судна, от 1 до 60 мин. на эшелоне полета и от 20 до 300 сек при снижении. Время поступления информации: примерно через 10 минут от момента наблюдения.

Информация об интенсивности турбулентности, поступающая от пилотов, в значительной степени субъективна. Может быть точно установлен факт турбулентности, но без инструментальных измерений и расчетных методов интенсивность явления не оценить. Инструментальные данные получают за счет численных методов, так как оборудование, установленное на борту, не измеряет турбулентность непосредственно. Внутренней навигационной системой могут быть определены значения вертикального ускорения, пикового ускорения (**PA- Peak Acceleration**)- которое представляется через масштаб ускорения свободного падения. Классифицируют:

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| 1) $0.15g \leq PA < 0.5g$ | слабая (FBL) |
| 2) $0.5g \leq PA < 1g$ | умеренная (MOD) |

3) $PA \geq 1g$ сильная (SEV)

Альтернативный индикатор интенсивности турбулентности – величина рассчитанной эквивалентной вертикальной скорости порывов DEVG (Derived Equivalent Gust velocity).

Величина DEVG передается в сообщениях AMDAR как U_{de} :

$$U_{de} = \frac{10 * A * m * |\Delta n|}{V} \quad (1)$$

Где $|\Delta n|$ - характеристика пика вертикального ускорения

V - скорость ветра на момент наличия пика ускорения (в узлах)

m – общая масса ВС(в тоннах)

A – особый параметр ВС (зависит от типа ВС)

На основе величины DEVG интенсивность определяется как:

- | | |
|----------------------------|----------|
| 1) $2 \leq DEVG < 4.5$ м/с | FBL TURB |
| 2) $4.5 \leq DEVG < 9$ м/с | MOD TURB |
| 3) $DEVG \geq 9$ м/с | SEV TURB |

Существует также критерий интенсивности болтанки, определяемый через приращение перегрузок.

Приращение перегрузки (Δn) выражается отношением ускорения ВС в вертикальной плоскости к ускорению свободного падения.

$$\Delta n = \frac{mj}{mg} = \frac{j}{g} \quad (2)$$

где: m -масса ВС, j - ускорение, получаемое самолетом при полете в турбулентной атмосфере

Важно!!! Судно приобретает вертикальное ускорение под влиянием воздушного вертикального порыва, без вмешательства пилота в управление.

Зависимость приращения перегрузки от различных факторов отражена в формуле 3:

$$\Delta n = \frac{\rho \times V \times w \times C_y^\alpha \times S}{2G}$$
(3)

где: Δn - приращение перегрузки; ρ – плотность воздуха; V - скорость ВС;

C_y^α - производная коэффициента подъемной силы по углу атаки α ; G – полетный вес ВС;
 S – площадь несущей поверхности крыла; w - скорость эффективного воздушного вертикального порыва; [8]

При полете в одной и той же турбулентной зоне, при одной и той же величине вертикального порыва самолеты разных типов будут испытывать различные перегрузки.

В соответствии со стандартами ИКАО интенсивность болтанки оценивается по трем градациям (Табл. 2):

Таблица 2 Критерий качественной и количественной оценки интенсивности турбулентности

Интенсивность болтанки	Значение приращения вертикальной перегрузки Δn ВС в долях g^*	Вертикальные порывы ветра	Качественная оценка интенсивности болтанки
Слабая (FBL)	$ \Delta n < 0.5g$	менее 10 м/с	Вздрагивание или слабая тряска самолета
Умеренная (MOD)	$0.5g \leq \Delta n \leq 1.0g$	10-15 м/с	Частые толчки, покачивание самолета, изменение высоты
Сильная (SEV)	$ \Delta n > 1.0g$	более 15 м/с	Резкие вздрагивания, отдельные броски, большой крен и рысканье

Данные критерии применяются в международной практике для всех этапов полета воздушных судов. Влияние вихря на крыло ВС меняется в зависимости от скорости и направления полета относительно ветра, а так же от интенсивности самого вихря, его размеров и ориентации.

Ещё один альтернативный критерий инструментальных измерений – скорость вихревой диссипации (**EDR- Eddy Dissipation Rate**). Величина не зависит от типа ВС, описывает спектр вертикальных порывов турбулентного воздуха вокруг судна.

С 2004 г. индекс EDR считается официально признанным ИКАО критерием интенсивности турбулентности и указывается в сообщениях AMDAR. До 2007 года интенсивность определялась через соотношения максимальных и средних значений EDR, но с 2007 г. в шестнадцатом издании Приложения 3 ИКАО, утверждены изменения, относительно этого индекса. Сейчас измеряют так же значения средних (15 мин) и максимальных значений EDR, но интенсивность болтанки определяется, как кубический корень из максимального значения.

- 1) $0.1 < \text{Максимальное значение кубического корня из EDR} \leq 0.4$ FBL
- 2) $0.4 < \text{Максимальное значение кубического корня из EDR} \leq 0.7$ MOD
- 3) $\text{Максимальное значение кубического корня из EDR} > 0.7$ SEV

Отображение значений EDR предусматривается специальным программным обеспечением (СПО). Они могут появиться в таблице, если самолет попал в зону турбулентности в области построения профилей. Данные о турбулентности могут передаваться также в альтернативных терминах: а) степень турбулентности (в таблице - Turb) и б) производная эквивалента вертикального порыва ветра (VS). Пример информации в формате AMDAR представлен на рис.4, полное сообщение представлено в приложении 2.

Ввод							Выход						
H,m	Lat,deg	Lon,deg	T,degC	DD,deg	FF,m/s	Turb	Hmin	Hmax	Icinq	HI,m	VS,m/s	EDR	R,q/kg
457.0	59.8	30.3	-0.4	199.0	11.8	-	-	-	-	-	0.9	-	-
518.0	59.8	30.3	-0.4	207.0	13.9	-	-	-	-	-	0.4	-	-
579.0	59.8	30.4	-0.7	213.0	15.4	-	-	-	-	-	2.0	-	-
671.0	59.8	30.4	-0.7	219.0	17.5	-	-	-	-	-	1.7	-	-
792.0	59.8	30.4	-1.2	228.0	20.1	-	-	-	-	-	3.2	-	-
853.0	59.8	30.4	-0.9	232.0	20.6	-	-	-	-	-	4.4	-	-
945.0	59.8	30.5	-1.4	236.0	21.1	-	-	-	-	-	0.3	-	-
1006.0	59.8	30.5	-1.9	240.0	21.6	-	-	-	-	-	0.7	-	-
1036.0	59.7	30.6	-1.9	239.0	22.1	-	-	-	-	-	0.8	-	-
1067.0	59.8	30.5	-1.9	240.0	21.6	-	-	-	-	-	0.6	-	-
1128.0	59.7	30.8	-2.4	242.0	22.7	-	-	-	-	-	0.6	-	-
1219.0	59.7	30.8	-2.9	244.0	22.7	-	-	-	-	-	0.1	-	-
1280.0	59.6	30.8	-3.4	249.0	22.7	-	-	-	-	-	0.9	-	-
2256.0	59.5	30.8	-7.7	241.0	21.6	-	-	-	-	-	0.1	-	-
2377.0	59.5	30.7	-8.2	242.0	23.2	-	-	-	-	-	0.0	-	-
3170.0	59.5	30.2	-13.4	249.0	21.6	-	-	-	-	-	0.0	-	-

Рис.4 Сообщение в формате AMDAR при наличии турбулентности (посадка воздушного судна - аэродром Санкт-Петербург (Пулково))

Где H - высота полета в метрах

lat/lon - широта/ долгота в градусах,

T - температура в градусах Цельсия

DD – направление ветра в градусах

FF – скорость ветра в м/с

Turb – степень турбулентности

Hmin/Hmax – минимальная/максимальная высота

Icing – обледенение

HI – высота уровня обледенения в метрах

VS – производный эквивалент вертикального порыва ветра

EDR – индекс EDR

R - влажность

2.2 Повторяемость турбулентности

Турбулентность, вызывающая болтанку самолетов на различных высотах встречается неодинаково часто. Поэтому тропосферу делят на три слоя по повторяемости турбулентности в них, стратосферу - на два [Богаткин,2005; Турбулентность в...,1976]:

- Нижний (0-2 км)
- Средний (2-6 км)
- Верхний (6-11 км)
- Нижняя стратосфера (11-16 км)
- Средняя стратосфера (выше 16 км)

Нижний слой наиболее турбулизирован за счет неоднородности подстилающей поверхности. Поэтому повторяемость болтанки наибольшая.

В «среднем» слое влияние земной поверхности уменьшается, но и влияние градиентов ветра, связанных со струйными течениями еще не значительно.

Верхний слой более подвержен влиянию струйных течений, более турбулизирован за счет больших неоднородностей в поле температуры и поле скоростей ветра.

Наиболее устойчиво стратифицирована стратосфера, особенно средняя. Но и на данных уровнях отмечается болтанка, воспринимаемая экипажем как очень жесткие удары по поверхности ВС. Как пишет О.Г. Богаткин в своих трудах: «Обусловлено это

большими скоростями полета на этих высотах и возможностью увеличения угла атаки до критических при малых начальных вертикальных порывах.» (Богаткин, 2005)

2.3 Синоптические условия повторяемости турбулентности

Большой вклад в установление связей между синоптической ситуацией (распределением барических атмосферных полей) и болтанкой воздушных судов сделал Пчелко И.Г. в своей работе «Аэросиноптические условия болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосфере». (1962)

Исследования характера барического поля при зарегистрированных случаях болтанки ВС позволило выделить пять основных типов синоптических ситуаций, наиболее благоприятных для возникновения болтанки судна (рис.5).

I тип барического поля:

Глубокая высотная ложбина, в которой выделяется отдельный циклон. Зоны болтанки в таком случае расположены в области сходимости и расходимости изогипс (рис. 5.а.). Скорость ветра в зонах болтанки составляет 27-42 м/с(100-150 км/ч), средние значения горизонтальных сдвигов ветра, как правило, превышают 4-6 м/с (15-20 км/ч) на 100 км.

В области сходимости изолиний преобладают случаи с умеренной (MOD) болтанкой ВС, в области расходимости - сильной (SEV). (Пчелко, 1962) Также, Пчелко И.Г. отмечал, что вероятность сильной болтанки повышается в случаях резко выраженной сходимости потока, значительном сдвиге и скорости ветра.

II тип барического поля:

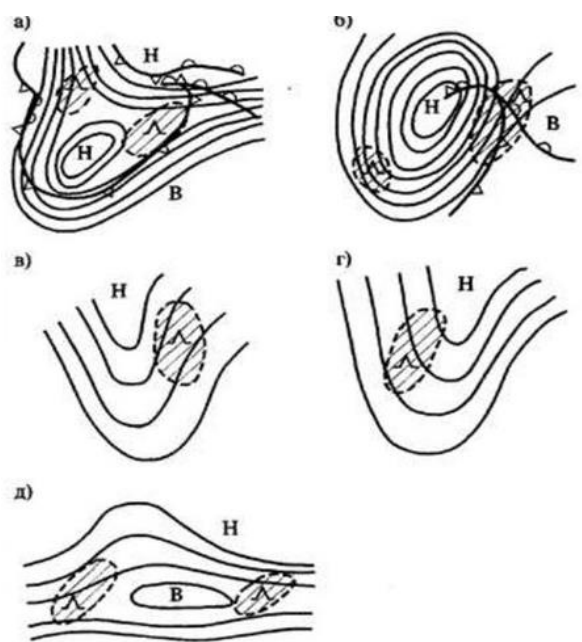


Рис.5 Распределение и положение зон болтанки при различных типах синоптических ситуаций:

а - барическое поле, выраженное глубокой высотной ложбиной, б - высотный циклон, в- передняя часть ложбины, г - тыловая часть ложбины, д-область высотного гребня

Высотный циклон с двумя областями (рис. 5.б), в которых чаще регистрируется турбулентность. (Табл. 3)

Таблица 3. Характеристика турбулентных областей в высотном циклоне.

Тыл циклона (тылЦ)	Передняя часть циклона (пчЦ)
<ul style="list-style-type: none"> – скорость ветра 27-33 м/с (100-120 км/ч) – сходимости изогипс – умеренная турбулентность 	<ul style="list-style-type: none"> – скорость ветра 27-42 м/с (100-150 км/ч) – сильная расхожимости изогипс – большие горизонтальные сдвиги ветра (до 50 км/ч на 100км) – турбулентность умеренная/ сильная

III и IV тип барического поля представляют собой выраженную ложбину:

Третий тип характеризуется передней частью ложбины - правее оси (перед осью), в области расхожимости изогипс (рис. 5.в). Скорость ветра в данной зоне не превышает 27м/с (100км/ч), боковые сдвиги ветра - незначительны.

Четвертый тип характеризуется тыловой частью ложбины- областью схождения изогипс. (рис. 5.г) Скорость ветра в зоне- 22-27м/с (80-100 км/ч), боковой сдвиг- 1-3 м/с (5-10 км/ч) на 100 км.

V тип барического поля:

Высотный гребень с двумя зонами болтанки: передняя и тыловая (рис 5.д) Скорость ветра незначительна 40-60 км/ч, боковые сдвиги также невелик: 10-15 км/ч.

Предложенные схемы работают на различных высотах как в тропосфере, так и в стратосфере. Пчелко И.Г. предлагает еще несколько зон, с наиболее вероятным случаем болтанки:

- 1) Холодные фронты 1 и 2 рода;
- 2) Теплый или холодный фронты окклюзии, связанные с тропосферными или стратосферными струйными течениями;
- 3) Стратосферные и высокотропосферные струйные течения;
- 4) Периферия циклона, ложбина и гребень;
- 5) Облачность;

- 6) Адвекция холода;
- 7) Сильное усиление ветра на эшелоне, рассчитанное по данным соседних по времени зондирований в данном районе;

Зная синоптическую ситуацию в районе и другие данные, которыми располагает синоптик, можно оценить возможность возникновения турбулентных зон. Мы же в работе остановимся на пяти основных типах.

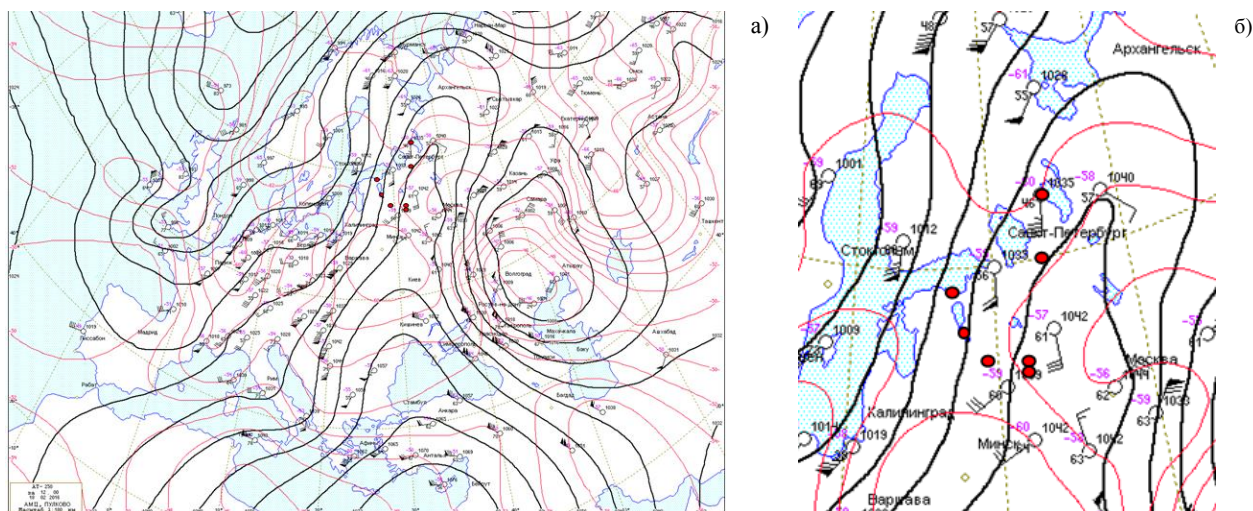


Рис. 7 Синоптическая карта: а - в масштабе карты, б-рассматриваемый район (FIRULLI)

Все точки отмечались на синоптических картах, взятых из архивных баз данных АМЦ Пулково. (Рис.7)

За 2016 год были проанализированы 340 случаев наличия турбулентности умеренной(MOD) и сильной (SEV) интенсивности, и 24 сообщения об ее отсутствии. По данным самолетных измерений были построены профили вертикального распределения повторяемости случаев умеренной и сильной турбулентности. (Рис.8) Следует отметить, что повторяемость турбулентности минимальна в средней тропосфере и возрастает по мере приближения к тропопаузе или к уровню с максимальной скоростью ветра.

Несмотря на то, что полученный результат совпадает с результатами ученых, описанных в пособии «Турбулентность в свободной атмосфере».(10), мы не можем с точностью считать его достаточно обоснованным, так как большинство самолетов над данной территорией пролетают на эшелонах, отнесенных к геопотенциальной поверхности 250 гПа - высотам 10-11 км. Следовательно, то, что происходит ниже, может быть просто не зарегистрировано за отсутствием пролетающих бортов на данной высоте.

Из имеющихся у нас данных видно, что максимальная повторяемость болтанки приходится на уровень 250гПа (эшелоны полета FL330-360), где она достигает 50% всех случаев, а также на уровнях 200 гПа и 300 гПа(18- 19% соответственно; Рис.8).

При анализе термобарических полей мы использовали классификацию по пяти основным типам, рассмотренную выше. (Рис.5) Но в процессе обработки прослеживалась закономерность и при других конфигурациях барического поля, поэтому было выделено еще шесть типов с возможными случаями возникновения турбулентности. (Прил.1)

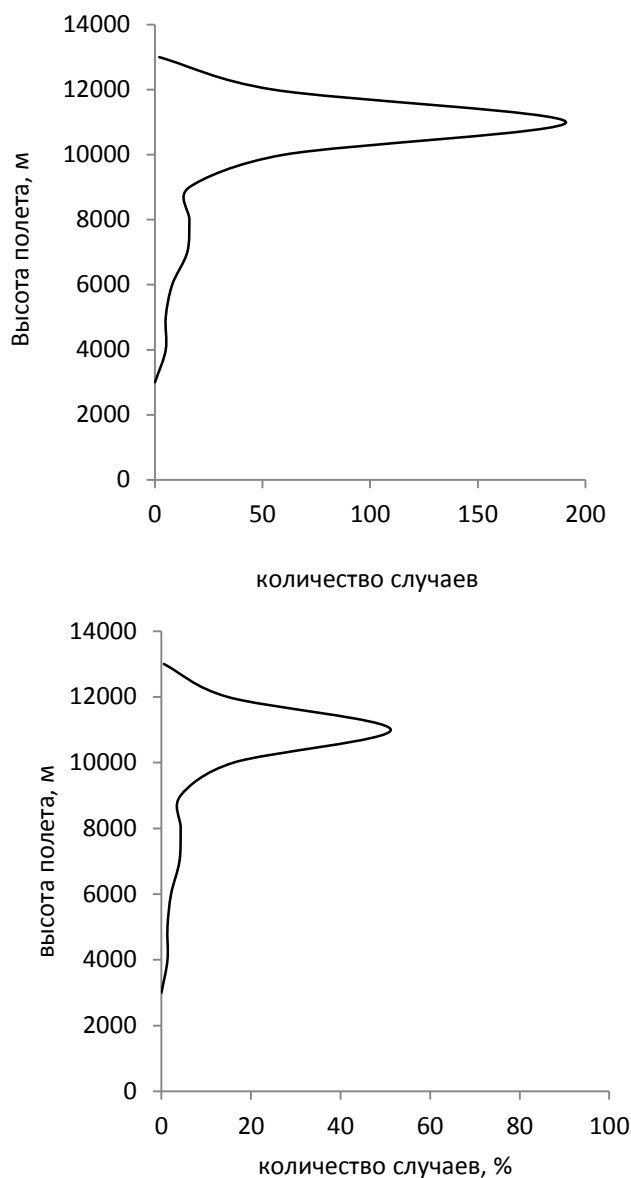


Рис.8 Повторяемость турбулентности на различных эшелонах полета в ULLI FIR

Тип Д* — резко «вдающийся» в общий поток гребень, изолинии образуют форму «Омега» (Ω), на картах АТ любого уровня выделяется из общей «синоптической картины». Турбулентность регистрируется в двух частях: передняя (перед осью гребня - пер.) и тыловая (за осью гребня – тыл.). В 100 % случаев в области «Д* тыл» скорость ветра не превышает 90 км/ч - направление 240-10°, в области «Д* пер» только в 80% случаев скорость ветра была < 90 км/ч. (Прил.1, Д*)

Тип Ж представляет собой замкнутую изолинию – окрестность центра циклона. В 100% рассматриваемых случаев скорость ветра не превышала 90 км/ч, ветер СЗ-С: 240-30° (здесь и далее отсчет направления ветра происходит по часовой стрелке, Н-р, 240-30: это 240-250-260-.....-360-30). (Прил.1,Ж)

Тип Е представляет собой барический гребень (гребень антициклона), турбулентность в котором регистрируется

на оси гребня, под «самой острой точкой» изогипсы. (прил.1,Е) В 70% случаев турбулентность отмечалась при скоростях ветра < 90 км/ч, направление ветра имеет Ю-ЮЗ составляющую: 150-270°.

Тип 3 и К представляют собой градиентное поле с почти прямолинейными изогипсами между высотной барической ложбиной и высотным барическим гребнем, вдоль которого скорости ветра в 90% случаев относятся к скоростям ветра в струйных течениях: 100-252 км/ч. Направление ветра для типа 3, как и в целом поток, имеет ЮЗ составляющую: 180-270°. (Прил.1, 3) В случае К направление ветра, как и поток, в большинстве случаев СЗ направления. Но отмечались случаи, когда барическое поле «изменяло наклон» потока, тогда ветер становился С и СВ направления. (Прил.1, К)

Тип И - струя, где в областях сходимости (тыловая часть - тыл.) и расходимости (передняя часть – пер.) изогипс регистрировались турбулентные случаи. Для типа «И тыл» в 95% случаев скорость ветра варьируется от 90 км/ч до 180 км/ч. Направление ветра 240-270° - поток ЮЗ. Для типа «И пер» в 60% случаев скорость ветра составляла < 90 км/ч с преобладающим направлением: 210-330°.(Прил.1, И)

Тип Л – глубоко вдающийся, вытянутый гребень, в тыловой части которого (за линией оси) регистрируются случаи турбулентности. При этом в 90% случаев скорость ветра не превышала 90 км/ч (<90 км/ч) с направлением 180-270°. (Прил.1,Л)

На основе обработанных данных была составлена сводная характеристическая таблица (табл.4), в которой указаны характеристики полей ветра, имеющие наибольшую повторяемость (условно названы здесь и далее «преобладающими условиями») при различных типах синоптической ситуации для возникновения турбулентности в Санкт-Петербургском РПИ. Повторяемость турбулентности рассчитывалась от общего числа случаев, относящихся к указанному типу барического поля с учетом части барической системы данного типа.

Таблица. 4 Наиболее вероятные характеристики полей ветра для различных типов высотных барических полей в Санкт-Петербургском РПИ.

Тип барического поля	Часть барической системы	Преобладающие условия			Повторяемость (%) случаев с преобладающими условиями*
		Скорость ветра км/ч	Направление ветра(°)	Направление основной оси или воздушного потока	
А	Передняя часть ложбины	90-140	150-240	СЗ-ССВ,Ю	36
		<90	90-270	СЗ-СВ	52
	Тыловая часть ложбины	90-140	270-360	СЗ-С	50
		<90	270-360	СЗ-СВ	50
Б	Передняя часть циклона	90-110	180-240	-	23
		<90	120-240	СЗ-СВ	77
	Тыловая часть циклона	<90	340	СЗ	100
		110-180	180-240	С-ССВ	90
В	-	90-160	180-240	С-ССВ	90
		<90	210	ССВ	10

Г	-	>90	300-360	ССЗ-ССВ	95
		<90	340	ССЗ	5
Д	Передняя часть гребня	100-140	270-300	ЮЗ-З	80
		< 90	260	ЮВ	20
	Тыловая часть гребня	100-120	210-270	ЮВ-ЮЗ	50
		< 90	150-240	Ю-ЮВ	50
Д*	Передняя часть гребня	140-160	230	ССВ	18
		< 90	180-240	Ю-С	82
	Тыловая часть гребня	< 90	10-240	С	100
Е	-	90-140	210-240	ЮВ-Ю, С	30
	-	< 90	150-270	ЮВ-ЮЮЗ, С	70
Ж	-	< 90	30-240	С-СЗ	100
З	-	110-220	180-270	ЮЗ ПОТОК	90
		< 90	180-240	Ю-ЮЗ	10
И	Передняя область расходимости изогипс	90-180	240-330	ЮЗ, С	40
		< 90	210-330	З, С	60
	Тыловая область сходимости изогипс	90-180	240-270	ПОТОК З	95
		< 90	270	ПОТОК З	5
К	-	90-250	270-360	СЗ-СВ	80
		< 90	360	С	20
Л	-	90-110	180-270	Ю-ЮЗ	10
		< 90	180-270	ЮЮВ-ЮЗ	90

**Повторяемость (%) случаев о преобладающими условиями от числа случаев, относящихся к данному типу барического поля*

При обработке данных бортовой погоды и синоптических карт, составлялась сводная таблица, в которой отмечались все интересующие нас характеристики по каждому случаю турбулентности: скорость ветра, направление ветра, направление основной оси синоптического объекта (ложбина, гребень, поток и др), термическая

адвекция и тип барического поля. В таблице 5 представлена повторяемость (%) турбулентности при различных типах барического поля на различных эшелонах полетов, рассчитанная от общего числа случаев на эшелоне.

Таблица.5 Повторяемость(%) числа случаев сильной и умеренной турбулентности на эшелонах полетов в зависимости от типа барического поля

Изобарическая поверхность (гПа)	Эшелон	Тип барического поля												Количество случаев на эшелоне
		<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>д*</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>	<i>к</i>	<i>л</i>	
200	370-390	17	0	6	8	11	6	17	0	3	3	22	8	36
250	330-360	28	2	6	6	4	7	5	2	9	2	21	10	105
300	270-320	19	5	5	0	10	2	7	0	17	24	12	0	42
400	220-260	0	7	0	0	21	14	7	7	0	21	14	7	14
500	150-210	13	6	0	0	6	6	13	19	6	25	6	0	16
700	90-140	40	40	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	5

На уровнях 400 гПа, 500 гПа, 700 гПа количество случаев недостаточно для обобщения условий. Как отмечалось ранее, малое количество зарегистрированных случаев не говорит об отсутствии турбулентности в этом слое атмосферы.

Анализ полученных данных, представленных в Таблице 5 показывает, что в слое 300-200 гПа турбулентность возникает наиболее часто при типах барического поля А, Д, Е, З, И, К. Для каждого эшелона характерен свой тип барического поля с наиболее вероятным случаем возникновения турбулентности. Рассмотрим основные из них более подробно.

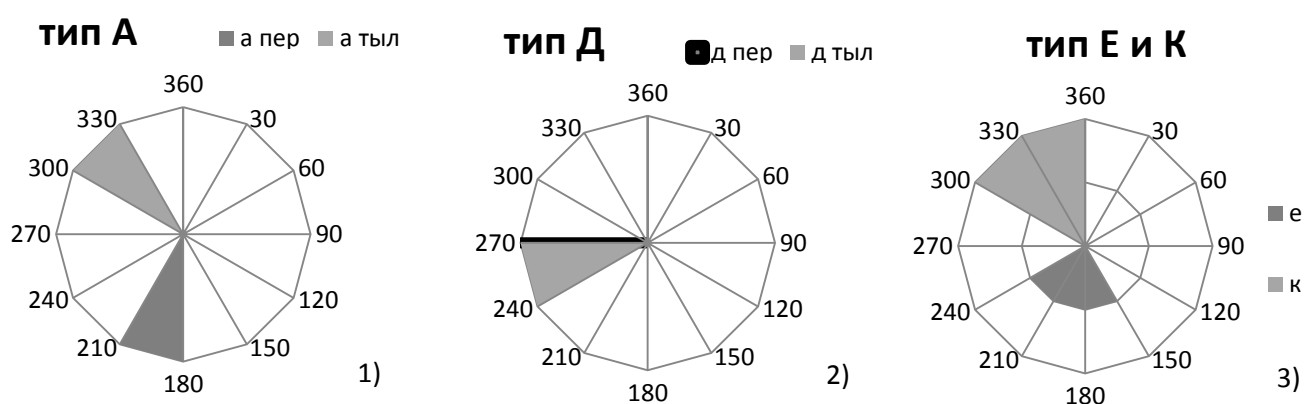
Поверхность 200 гПа. На изобарической поверхности 200гПа – на эшелонах полета 370-390 FL- наиболее часто турбулентность регистрировалась при типах «А», «Е» и «К», что составляет более 50% от всех случаев на поверхности. Характерные значения полей ветра для данной поверхности представлены в таблице 6 и на диаграмме 1-3.

Таблица.6 Поле ветра при различных типах барического поля на уровне 200гПа

Тип барического поля	Часть барической системы	Преобладающие условия		Повторяемость (%) случаев с преобладающими условиями
		Скорость ветра, км/ч	Направление ветра	
А	передняя	< 90	180-210	100

	тыловая	< 90	300-330	100
Д	передняя	< 90	270	50
		100	270	50
	тыловая	< 90	240-270	100
Е	-	< 90	150-240	60
К	-	90-140	300-360	90

Диаграмма 1 - 3. Преобладающие условия полей ветра на уровне 200 гПа при формировании барического поля типа «А», «Д» «Е», «К».



Поверхность 250 гПа. На изобарической поверхности 250гПа – на эшелонах полета 330-360 FL – чаще всего турбулентность отмечалась в типах «А» и «К» - что в сумме составляет 40% от всех случаев на данном уровне. Характерные значения полей ветра для данной поверхности представлены в таблице 7 и на диаграмме 4-5.

Таблица 7. Поле ветра при различных типах барического поля на уровне 250гПа

Тип барического поля	Часть барической системы	Преобладающие условия		Повторяемость (%) случаев с преобладающими условиями
		Скорость ветра, км/ч	Направление ветра(°)	
А	Передняя часть ложбины	90-110	150-210	60
	Тыловая часть ложбины	90-110	300-360	64
К	-	90-250	270-360	80

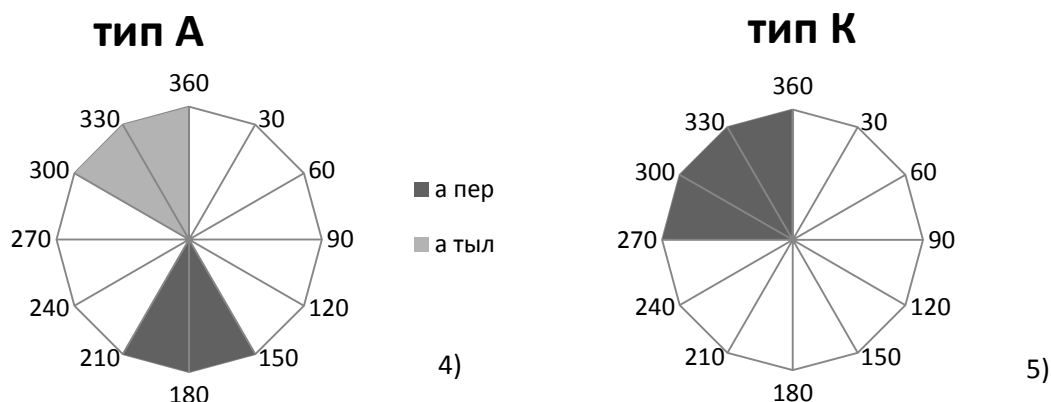


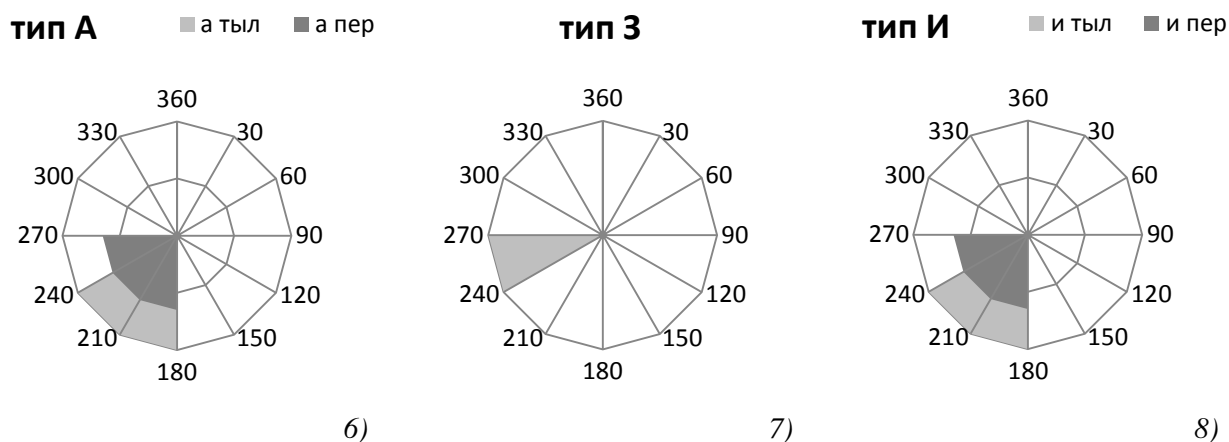
Диаграмма 4-5. Преобладающие условия полей ветра на уровне 250 гПа при формировании барического поля типа «А», «К».

Поверхность 300гПа. На поверхности 300 гПа – эшелоны полета 270-320 FL - большее число случаев приходится на тип барического поля «А», «З» и «К» - 60% всех случаев на данном уровне. Характерные условия полей ветра представлены в таблице 8 и диаграммах 6-8.

Таблица 8. Поле ветра при различных типах барического поля на уровне 300гПа

Тип барического поля	Часть барической системы	Преобладающие условия		Повторяемость (%) случаев с преобладающими условиями
		Скорость ветра, км/ч	Направление (°)	
А	Передняя часть ложбины	< 90	180-270	50
	Тыловая часть ложбины	90-162	180-240	50
З	-	108-216	240-270	90
И	Передняя область расходимости изогипс	< 90	270-300	50
	Тыловая область сходимости изогипс	90-162	240-270	50

Диаграмма 6-8. Преобладающие условия полей ветра на уровне 250 гПа при формировании барического поля типа «А», «З», «И».



Адвекция. Также рассматривалась адвекция воздушных масс при различных типах барического поля. Основные результаты представлены в таблицах 8.9.10. Стоит отметить, что из 27 случаев возникновения турбулентности при конфигурации барического поля по типу «а» при нулевой адвекции 16 из них возникало на эшелоне 330-360 (250 гПа), 10 из 15 случаев - при адвекции тепла (34% и 55% соответственно); Из 22 случаев турбулентности на уровне 200гПа при конфигурации барического поля по типу «к» 14 из них происходило при нулевой адвекции(64%).

Изобарическая поверхность (гПа)	Эшелон полета	А	Б	В	Г	Д	Д*	Е	Ж	З	И	К	Л	Σ
200	370-390	3	0	2	0	1	1	1	0	0	1	3	1	16
250	330-360	16	0	0	1	1	2	3	2	3	0	14	6	48
300	270-320	7	2	0	0	1	1	2	0	3	5	3	0	24
400	220-260	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	4
500	150-210	0	1	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	7
700	90-140	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
-	Σ	27	4	2	1	5	6	7	3	6	8	22	8	-

Таблица 8. Число случаев возникновения турбулентности при различных типах барического поля на различных эшелонах полета при нулевой адвекции

Изобарическая поверхность (гПа)	Эшелон полета	А	Б	В	Г	Д	Д*	Е	Ж	З	И	К	Л	Σ
---------------------------------	---------------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---

200	370-390	1	0	0	0	2	1	3	0	1	0	2	2	12
250	330-360	10	0	5	2	1	3	2	0	2	1	3	4	35
300	270-320	1	0	2	0	2	0	1	0	1	4	2	0	13
400	220-260	0	1	0	0	3	1	1	1	0	2	1	0	10
500	150-210	2	0	0	0	0	0	1	1	1	3	0	0	8
700	90-140	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-	Σ	15	2	7	2	8	5	8	2	5	10	8	6	-

Таблица 9. Число случаев возникновения турбулентности при различных типах барического поля на различных эшелонах полета при адвекции тепла

Изобарическая поверхность (гПа)	Эшелон полета	А	Б	В	Г	Д	Д*	Е	Ж	З	И	К	Л	Σ
200	370-390	2	0	0	3	1	0	2	0	0	0	3	0	14
250	330-360	3	2	1	3	2	2	0	0	4	1	5	1	26
300	270-320	0	0	0	0	1	0	0	0	3	1	0	0	5
400	220-260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	150-210	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
700	90-140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	Σ	5	2	1	6	4	2	2	1	7	2	8	1	-

Таблица 10. Число случаев возникновения турбулентности при различных типах барического поля на различных эшелонах полета при адвекции холода.

Данные AMDAR. Нами были рассмотрены 1500 сообщений в формате AMDAR за период январь-май 2019 года. Из них только 20 содержали информацию о наличии турбулентности (слабой, умеренной, сильной). При анализе данные по турбулентности не классифицировались по интенсивности, а рассматривались в целом, так как сообщений недостаточно для детализации по интенсивности. Данные сообщений AMDAR соотносили с картами абсолютной топографии (АТ). Так как в сообщениях значения высот крайне редко превышали 5 км, адвекция и термобарические поля рассматривались только на трех уровнях: АТ-850, АТ-700 и АТ-500. Проанализировав полученные данные, следует отметить, что на изобарической поверхности 850гПа типизация барического поля не прослеживается, а с уровня 700гПа - начинает проявляться. (табл.11) Однако, этот вывод является предварительным, т.к. число случаев наличия турбулентности мало.

Изобарическая поверхность 850 гПа			
Тип барического поля	Адвекция тепла	Адвекция холода	Нулевая (нейтральная) адвекция
Д*(тыловая часть гребня)	0	0	1
Ж	1	2	0
З	0	1	0
-	3	3	5

Изобарическая поверхность 700 гПа			
Тип барического поля	Адвекция тепла	Адвекция холода	Нулевая (нейтральная) адвекция
В	1	0	0
Г	0	2	0
Д* (тыловая часть гребня)	1	0	0
Ж	0	2	0
З	0	1	3
К	1	0	3
-	1	1	2

Изобарическая поверхность 500 гПа			
Тип барического поля	Адвекция тепла	Адвекция холода	Нулевая (нейтральная) адвекция
В	0	1	0
Г	0	1	0
Ж	0	2	0
З	0	2	2
И (тыловая область сходимости изогипс)	1	1	0
К	0	1	1
-	1	1	2

Таблица.11. Повторяемость (число случаев) адвекции разных видов при разных типах барического поля на уровнях: 850, 700, 500 по данным сообщений AMDAR.

3.2 Рекомендации

При прогнозе турбулентности на эшелонах полета 270-390 следует обращать особое внимание на следующие типы барических полей: «А», «Д», «Е», «З», «И», «К».

Дополнительно при прогнозе турбулентности можно рассматривать полученные характеристики поля ветра (направление и скорость ветра) на каждом уровне.

Заключение

Суть синоптического метода прогноза турбулентности, вызывающей болтанку воздушных судов, заключается в комплексном анализе фактических и прогностических приземных карт погоды и карт барической топографии разных уровней, на которых выделяются области с наибольшей вероятностью болтанки. В данной работе проведен анализ высотных карт для выявления особенностей барических полей в зоне Санкт-Петербургского РПИ, характеристик полей ветра и характер термической адвекции.

Анализ информации о полетах воздушных судов в зонах интенсивной турбулентности позволил установить связь расположения этих зон с различными особенностями атмосферных полей, и сформулировать некоторые правила для применения на практике. При этом главное внимание было обращено на особенности термобарического поля на различных эшелонах полета, а также на наличие в районе полетов струйных течений.

Исследование характера барического поля при зарегистрированных случаях болтанки самолетов за 2016 год позволило выделить шесть дополнительных типов барического поля, характерных для возникновения зон интенсивной турбулентности в Санкт-Петербургском районе полетной информации.

Таким образом, в Санкт-Петербургском районе полетной информации основными типами барического поля с наибольшим числом зарегистрированных случаев болтанки являются типы «А», «Д», «Е», «З», «И», «К».

Также была установлена взаимосвязь между различными типами барических полей и численными значениями направления и скорости ветра на различных эшелонах полета для использования этой взаимосвязи при прогнозировании турбулентности.

Рассмотренные сообщения об отсутствии болтанки не были связаны с рассмотренными типами термобарических полей.

Также стоит отметить, что по результатам анализа характера адвекции было получено, что на эшелонах 330-360 умеренная и сильная турбулентность наиболее часто отмечалась при нулевой адвекции и адвекции тепла в рассматриваемом районе.

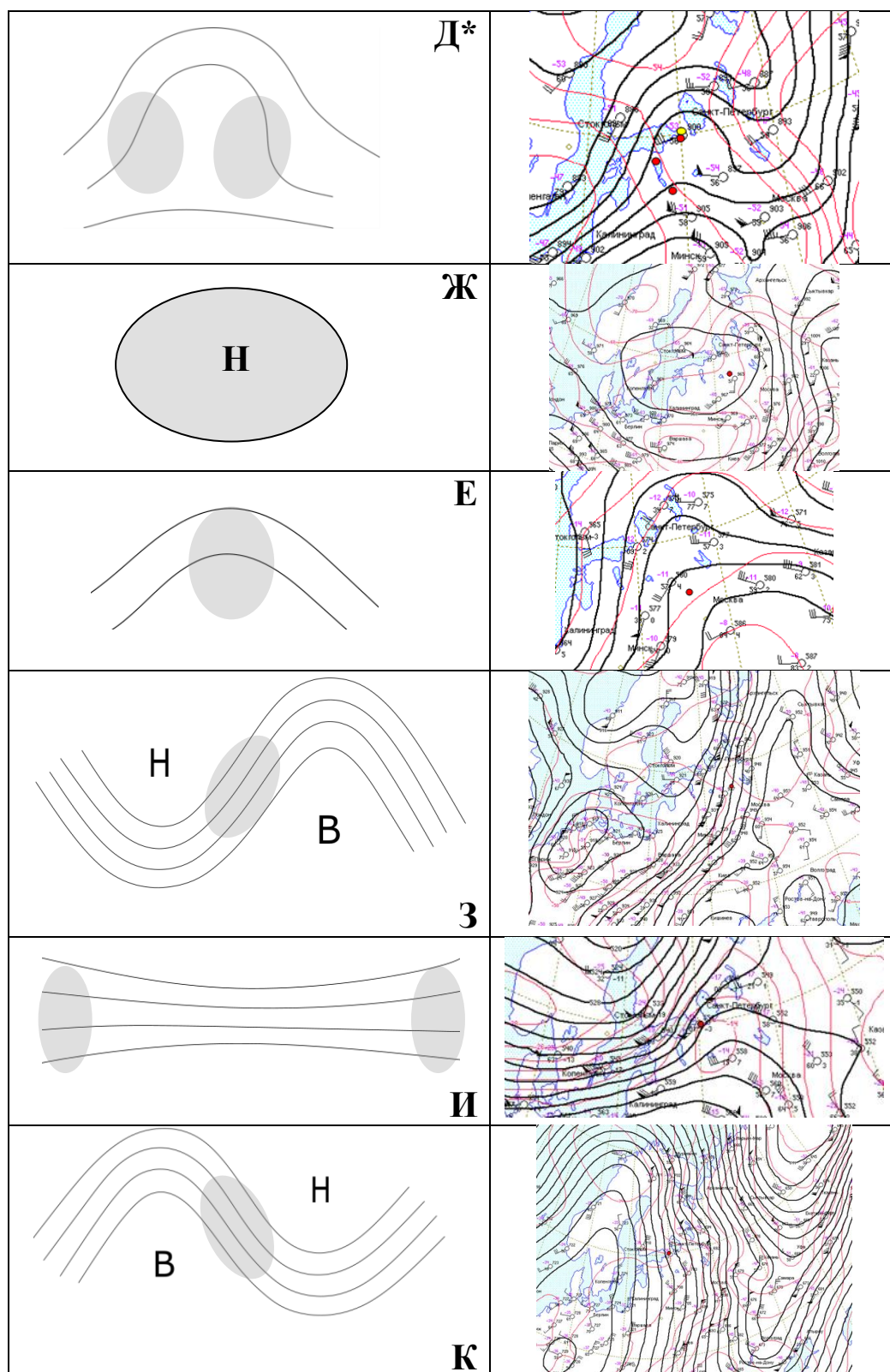
Анализ сообщений AMDAR о наличии турбулентности в районе полета показал, что на изобарической поверхности 850 гПа типизация барического поля не прослеживается.

Стоит отметить, что полученный результат не заменяет основные методы прогнозирования, а является вспомогательным, для детализации и уточнения прогнозов турбулентности. Окончательное суждение о возможности возникновения сильной турбулентности должно исходить из комплексного анализа синоптического положения, статистических характеристик, особенностей физико-метеорологических характеристик, при которых происходит полет, в совокупности с численными методами прогнозов погоды.

Список литературы

1. Федеральные авиационные правила №60 «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов»- ФАП-60/ Министерство транспорта России (Минтранс России)/2014
2. Авиационные факторы риска/ ВМО/ Секретариат ВМО/ Женева/ 2007
3. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации «Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации»/ ИКАО/ 2017
4. Прогнозирование метеорологических условий для авиации/ науч.-мет. пособие/ Н.П. Шакина, А.Р.Иванова/ ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»/ Москва/ 2016/ с 312
5. Практическая авиационная метеорология / учеб. Пособие/ Позднякова В.А./ Уральский УТЦ ГА/ Екатеринбург/ 2010/ с 113
6. Метеорологическое обеспечение полетов / учеб.пособие (3-е изд. перераб. и доп.)/ Г.П. Лещенко, Г.В. Перцель, Е.Г. Лещенко / ГЛАУ/ Кировград / 2010/ с 184
7. Методическая разработка «Авиационная метеорология. Тема 6: «Влияние ветра и турбулентности на деятельность авиации». Занятие 1: «Влияние ветра на деятельность авиации» »/ Акселевич В.И./ Военная кафедра/ РГГМУ/ Санкт-Петербург/ 2006 /с 27
8. Авиационная метеорология : учебн. пособие / Сафонова Т.В / УВАУ ГА / Ульяновск/ 2005 / с 215
9. Авиационная метеорология / Богаткин О.Г./ учеб. пособие/ РГГМУ/ Санкт-Петербург/ 2005/ с 328
10. Авиационные прогнозы погоды/ учебн. пособие по дисциплине «Авиационные прогнозы» / Блохина В.И. / ДВФУ / Владивосток/ 2000 / с 67
11. Турбулентность в свободной атмосфере/ Н.К. Винниченко, Н.З.Пинус, С.М.Шметер, Г.Н Шур / ред. Г.Я. Русакова / Гидрометиздат / Ленинград /1976 / с 289
12. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы/ издание 2 переработанное и дополненное/Л.Т. Матвеев/ науч.ред. В.Г.Морачевский/Гидрометиздат/ Ленинград/ 1984 / 752 с
13. Понять небо/ Д.Пэгин/ пер.-С.К. Жукарин /изд. «ПИЭЛ» / 1997 / с 227
14. Метеорологические условия полетов воздушных судов на малых высотах/ Пособие для метеорологов АМСГ, АМЦ, ЗАМЦ, ГАМЦ и для летного и диспетчерского состава гражданской авиации/ под ред. к.г.н. Васильевой А.А. и Рубинштейна М.В./ Гидрометиздат/ Ленинград/ 1983
15. Аэросиноптические условия болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосфере / Пчелко И.Г. / Главное управление гидрометеорологической службы при совете министров СССР/ Центральный институт прогнозов/ 1962/ с 96

Приложение 1



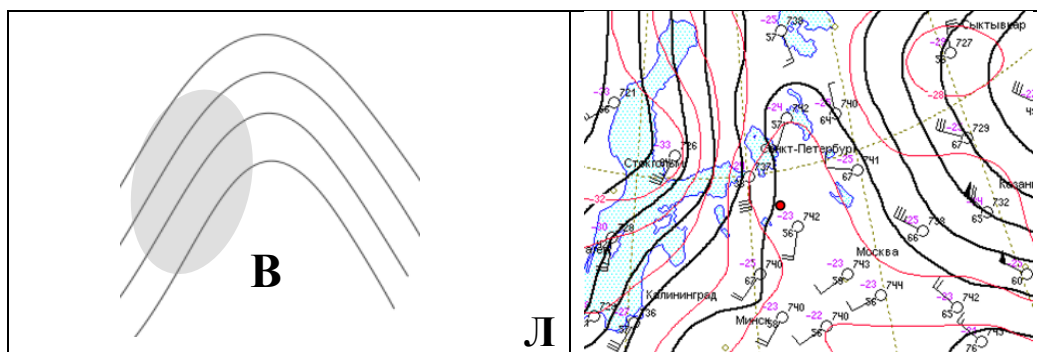


Рис. 9 Санкт-Петербургский РПИ

Приложение 2

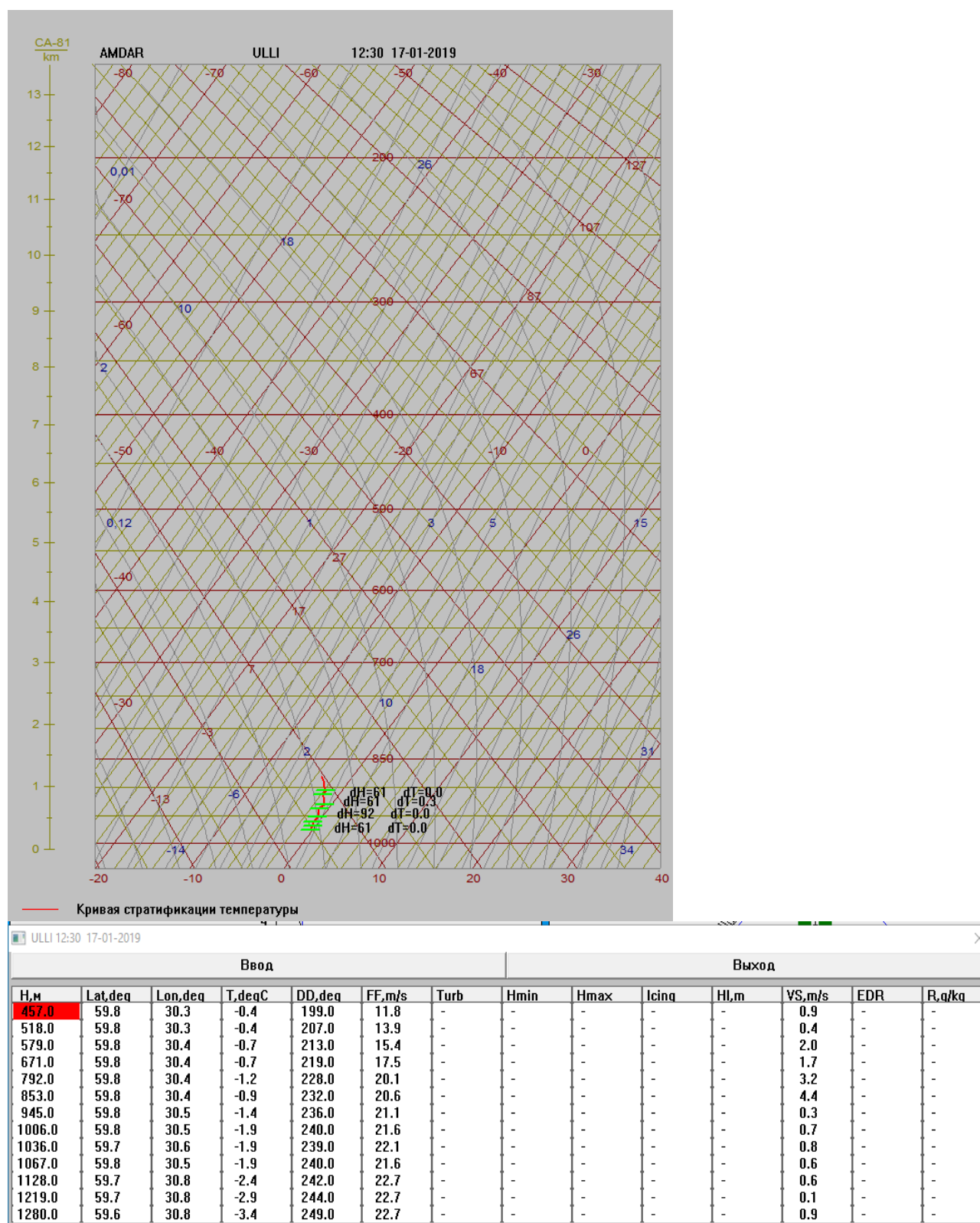


Рис. 3 Примеры визуализации данных AMDAR при наличии турбулентности: посадка воздушного судна 17.01.2019 г. - аэродром Санкт-Петербург (Пулково)

Сокращения, используемые в тексте

AMDAR – международная программа по сбору и передачи метеоинформации, полученной автоматически с бортов ВС.

AIREP – специальное сообщение о явлении или условии погоды, переданное с борта ВС посредством речевой связи, но явление, в отношении которого передано это сообщение, не требует выпуска SIGMET.

AIRMET – выпускаемая органом метеорологического слежения информация о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений и условий погоды по маршруту полета, которые могут повлиять на безопасность полетов ВС на малых высотах и которые не были уже включены в прогноз для полетов на малых высотах в соответствующем районе полетной информации, или его субрайоне.

CAT (clear air turbulence) - турбулентность ясного неба

FBL (Feeble) – слабый

FL (Flight) – эшелон полета

MOD (Moderate) -умеренный

SEV (Severe) – сильный

SIGMET – выпускаемая органом метеорологического слежения информация о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений погоды по маршруту полета и других явлений в атмосфере, которые могут повлиять на безопасность полетов воздушных судов.

TURB (Turbulence) – турбулентность

АМСГ – авиационная метеорологическая станция гражданская

АМЦ – авиационный метеорологический центр

АТ - абсолютная топография

ВМ - воздушная масса

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ВС - воздушное судно

ВФЗ – высотные фронтальные зоны

ЗП - земная поверхность

ИКАО – Международная организация гражданской авиации

ОВД – организация воздушного движения

РПИ – район полетной информации

СТ - струйное течение

ТЯН – турбулентность ясного неба

ХФ - холодный фронт

ЧПП – численный прогноз погоды